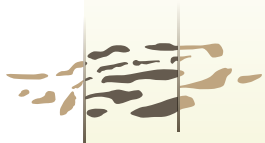




Plastic in de Waddenzee

Probleemverkenning
en mogelijke
oplossingsstrategieën

Quickscan



waddenacademie

Plastic in de Waddenzee

Probleemverkenning
en mogelijke
oplossingsstrategieën

Quickscan

September 2022

Bram van Duinen
Erik van Sebille
Bart Koelmans
Annemarie van Wezel

Colofon

Auteurs

Bram van Duinen
Erik van Sebille
Bart Koelmans
Annemarie van Wezel

Grafisch ontwerp

BW H ontwerpers

Foto omslag

Pixabay

ISBN

978-94-90289-63-8

Quickscan 2022-03

Gepubliceerd door Waddenacademie
© Waddenacademie september 2022

Referentie

Van Duinen, B. et al, 2022. Plastic in de Waddenzee: probleemverkenning en mogelijke oplossingsstrategieën, quickscan 2022-03, Leeuwarden.

Contactpersoon

Klaas Deen
Secretaris Waddenacademie
T 058 233 90 31
E klaas.deen@waddenacademie.nl
www.waddenacademie.nl

De basisfinanciering van de Waddenacademie
is afkomstig van het Waddenfonds.

INHOUDSOPGAVE

<i>Aanbiedingsbrief quickscan 'Plastic in de Waddenzee'</i>	4
Inleiding	8
1 Wat zijn de bronnen van plastic in de Waddenzee?	8
Algemeen: welke type bronnen zijn er wereldwijd voor plastic in de zee?	8
Specifiek: inzoomen op bronnen voor plastic in de Waddenzee	9
2 Welke soorten plastic worden aangetroffen in de Waddenzee?	10
Algemeen: welke soorten plastic zijn er?	10
Specifiek: welke soorten plastic worden aangetroffen in de Waddenzee?	11
3 Wat is de ecologische impact van het plastic?	11
Algemeen: wat is bekend over de ecologische impact van plastic?	11
Hoe kan de ecologische impact van plastic gemeten worden?	12
Resultaten: wat is de ecologische impact van plastic in de Waddenzee?	12
4 Strategieën om bedreigingen van plastic in Waddenzee te verminderen	13
Algemeen: welke strategieën zijn er bekend om de bedreigingen van plastic in zee te verminderen?	13
Welke van deze strategieën zijn geschikt/nuttig om toe te passen op de Waddenzee?	14
Welke actoren moeten betrokken worden bij oplossingsstrategieën?	15
Literatuur	16



waddenacademie

Waddenfonds
t.a.v. Martine Kriesels
Ruiterskwartier 121A
8911 BS LEEUWARDEN

Investeringskader Waddengebied
t.a.v. Albert Reitsema
Postbus 20120
8900 HM LEEUWARDEN

Ruiterskwartier 121A
NL-8911 BS Leeuwarden

T +31 (0)58 233 90 30

info@waddenacademie.nl
www.waddenacademie.nl

DIRECTEUR
Prof. dr. ir. Katja Philippart

Leeuwarden, 9 juni 2022

Betreft: Aanbieding quickscan 'Plastic in de Waddenzee'

Beste Martine en Albert,

Eind 2021 hebben jullie namens het Waddenfonds en het Investeringskader Waddengebied (IKW) de Waddenacademie laten weten dat beide organisaties de gezamenlijke ambitie hebben om de externe bedreigingen van de ecologie in het Waddengebied terug te dringen. Uit de midterm review van het IKW en de tussentijdse evaluatie van het Waddenfonds bleek recentelijk dat er nog geen robuuste programma's en projecten tot stand zijn gekomen voor het terugdringen van externe bedreigingen, waaronder die van plastics. De Waddenprovincies en het Waddenfonds streven ernaar om te komen tot een robuust Wadden breed programma voor het terugdringen van de externe bedreiging in de vorm van plastics in het Waddengebied; een programma dat kan worden uitgevoerd in de resterende periode van het IKW en WF. Jullie gaven hierbij aan dat om tot een dergelijk Wadden breed programma te komen een werkbijeenkomst met diverse stakeholders zal worden georganiseerd.

Het Waddenfonds en het IKW hebben de Waddenacademie gevraagd om als voorbereiding op de werkbijeenkomst en op basis van reeds uitgevoerde onderzoeken een verkenning uit te voeren met als aandachtspunten:

- Wat zijn de verschillende en belangrijkste bronnen van de diverse soorten plastics? Welke geografische gebieden (Noordzee, kanalen/rivieren/meren, vaste wal kust, eilanden, de Waddenzee) en welke vervuilers (economische centra als havens en recreatiecentra, beroeps en/ of recreatie scheepvaart, visserij, wadlopers) spelen hierin de grootste rol?
- Om welke soorten plastics gaat het daarbij dan vooral (grootte, chemische samenstelling), en welke zijn meest verontreinigend (toxische additieven, weekmakers, kleurstoffen, brandwerende stoffen) en vormen daarmee de grootste externe ecologische bedreiging?
- Wat zijn de mogelijke gevolgen van plasticvervuiling op het leven in de Waddenzee?
- Hoe is de grootst mogelijke impact te behalen met inzet van IKW/WF middelen? Met andere woorden: waar zou een Wadden-breed programma zich vooral op moeten richten (zoals preventie versus opruimen, groot plastic versus micro- en nanoplastics, één of meerdere bronnen en, zo ja, welke dan)?

De Waddenacademie heeft positief op dit verzoek gereageerd en Bram van Duinen MA gevraagd om een quickscan uit te voeren. Van Duinen is hierbij begeleid door prof. dr. Erik van Sebille (UU), prof. dr. Bart Koelmans (WUR) en prof. dr. Annemarie van Wezel (UvA). De Waddenacademie is hierbij eindverantwoordelijk.

In deze memo presenteren wij als Waddenacademie een korte samenvatting van de bevindingen zoals beschreven in de quickscan, aangevuld met enige aandachtspunten voor het opzetten van een Waddenzee-breed programma dat beoogt deze bedreiging terug te dringen.

Samenvatting quickscan

Bram van Duinen, Erik van Sebille, Bart Koelmans & Annemarie van Wezel (2022)
“Plastic in de Waddenzee: probleemverkenning en mogelijke oplossingsstrategieën”

Bronnen van plastics

Wereldwijd is het plastic afkomstig van drie hoofdbronnen, namelijk (i) het plastic afval afkomstig van bevolking minder dan 50 km van de kustlijn verwijderd (60%), (ii) rivieren die plastic afval transporteren van binnenland naar de zee toe (12%), en (iii) het plastic afval afkomstig van visserij, bijvoorbeeld netten, touwen en vispluis (18%).

Vanwege de overheersende stromingen wordt verwacht dat plastic vanuit **zee** vooral aanspoelt op kustlijnen van het Waddengebied die naar het westen gericht zijn. Wat betreft **rivieren** in het Waddengebied voert de Eems jaarlijks 13.400 kg plastic per jaar aan, en de IJssel 23.700 kg per jaar. Het water van de IJssel (en daarmee ook de plastics) komt uiteindelijk via het IJsselmeer in de Waddenzee terecht.

Soorten plastics in zee

Plastics in zee verschillen sterk qua formaat, en het grootste deel (in aantal) van de plasticdeeltjes in de oceaan wereldwijd zijn fragmenten van plastics. Op volgorde van groot naar klein zijn er macro- (groter dan 5 mm), micro- (tussen 1 μm en 5 mm) en nanoplastics (kleiner dan 1 μm). Het grootste deel van het plastic begint als macroplastic en fragmenteert over tijd in kleinere deeltjes door weersinvloeden, frictie met de bodem, en de golven op zee. Fragmentatie van plastic vindt hoofdzakelijk plaats in kustregio's en binnenwateren als rivieren, doordat deze invloeden vooral op die locaties optreden.

Gevolgen van plasticvervuiling

Er is momenteel nog weinig onomstotelijk bekend over de ecologische impact van plastics in de Waddenzee. Kortgezegd kan plastic een negatieve ecologische impact hebben als de blootstellingsconcentraties hoog genoeg zijn. Door de grote hoeveelheid variabelen is de mate waarin die negatieve invloeden optreden nog niet betrouwbaar in te schatten, met name gezien de onduidelijkheden in het type en de omvang van de blootstelling. Maar voordat negatieve impacts onomstotelijk aangetoond kunnen worden, is het mogelijk al te laat. Er is immers ook geen enkel bewijs dat de huidige plasticconcentraties in de Waddenzee veilig zijn. Gezien de persistentie van plastic mag bij gelijkblijvend gebruik verondersteld worden dat er met zekerheid ongewenste effecten gaan ontstaan.

Oplossingsstrategieën voor plastics

Het is voor alle opruimstrategieën van belang om ook eventuele ecologische schade door het gebruik ervan in overweging te nemen. Bij veel acties zal er enige ecologische schade optreden. Het ‘medicijn’ (opruimen van plastic) mag niet schadelijker worden dan de ‘kwaal’ (de aanwezigheid van plastic). In zijn algemeenheid zullen strategieën gericht op preventie gemakkelijker en op grotere schaal tot de gewenste verlaging van blootstelling leiden. Het is lastig om specifieke technieken te beoordelen op hun effectiviteit nu er nog veel onbekend is over de bronnen, de concentraties en de types plastic in de Waddenzee. Veel acties berusten daardoor nog vooral op aannames en minder op meetgegevens. Er zijn daarom eerst pilots nodig van mogelijke oplossingen, voordat ze op grote schaal toegepast kunnen worden.

Verdere aandachtspunten vanuit de Waddenacademie

Voorzorgbeginsel

De beperkte kennis over de effecten van plasticvervuiling op mens en milieu is geen reden om aan te nemen dat de effecten zelf dan ook beperkt zullen zijn. Mede gezien de lange levensduur en het uiteenvallen van grotere plastics in steeds kleiner wordende deeltjes (die steeds slechter uit het milieu te verwijderen zijn) van deze stoffen verdient het aanbeveling om vanuit het voorzorgbeginsel zo veel mogelijk en zo snel mogelijk een verdere plasticvervuiling tegen te gaan en bestaande plasticvervuiling uit het milieu te halen.

Ketenbenadering

Om verdere vervuiling te voorkomen en bestaande vervuiling te verminderen is het van belang om bij het ontwikkelen van oplossingsstrategieën de kennis, expertise en creativiteit van alle relevante partijen in de keten (waaronder beleidsmakers, beheerders, producenten, ondernemers, consumenten, verwerkers, opruimers, onderzoekers) in gezamenlijkheid te betrekken. De versnellingsgroep van de recent ingestelde ‘Community Plasticvrije Wadden’ zou hierbij een eerste aanspreekpunt kunnen zijn.

Duurzame oplossingen

Het ontwikkelen van duurzame oplossingsstrategieën vraagt om criteria voor een goede afweging van alternatieve maatregelen, bijvoorbeeld wat betreft (i) de reikwijdte (in hoeverre heeft een maatregel een lokaal, regionaal, nationaal of internationaal effect), (ii) de toekomstbestendigheid (in hoeverre vraagt de maatregel om een structurele inzet die de projecttijd overstijgt) en (iii) de kosten t.o.v. de baten (niet alleen financieel, maar bijvoorbeeld ook wat betreft ongewenste neveneffecten van een maatregel).

Wadden-breed programma

Op basis van het bovenstaande zou een Wadden-breed programma zich vooral moeten richten op:

- Preventie van vervuiling door alle soorten plastics omdat voorkomen (van ecologische schade) altijd beter is dan genezen;
- Het opruimen van met name grote delen plastics (omdat het opruimen van groot plastic relatief weinig ecologische schade aan het milieu toebrengt, er snel en tegen relatief lage kosten grote massa's verwijderd kunnen worden, en hiermee ook voorkomen wordt dat die grote plastics uiteindelijk in grote hoeveelheden micro- en nanoplastics worden omgezet);
- Het aanpakken van de bronnen van vervuiling die binnen de reikwijdte van beleid en beheer van het Waddengebied vallen (zoals het terugdringen van lokaal gebruik en het beperken van lokale verliezen, bijvoorbeeld door het ontwikkelen en toepassen van plasticvrije alternatieven).

Tot slot

Als Waddenacademie willen we benadrukken dat de quickscan als een eerste (en zeker niet complete) analyse van de plastics problematiek in de Waddenzee beschouwd moet worden. We hopen hiermee bij te dragen aan de discussie over de meest effectieve en efficiënte oplossingsstrategieën om, met inzet van IKW/WF middelen, plasticvervuiling in het Waddengebied te voorkomen en te verminderen. Een helder kader voor de afweging en een sterke samenhang tussen alle initiatieven binnen het beoogde programma is daarbij essentieel.

Tot nadere toelichting uiteraard altijd bereid.

Met vriendelijke groet,
Namens de Waddenacademie,

Prof. dr. ir. Katja Philippart
Directeur

INLEIDING

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de literatuur rondom het probleem van plasticvervuiling in de Waddenzee, en van mogelijke oplossingsstrategieën hiervoor. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van gepubliceerd wetenschappelijk onderzoek en andere onderzoeksrapporten. Er wordt ingegaan op de bronnen van het plastic, de samenstelling ervan, de ecologische risico's en mogelijkheden om de bedreigingen van het plastic te verminderen. Het rapport dient als startpunt voor een brainstorm over mogelijke oplossingen van het plasticprobleem in deze regio.

1. WAT ZIJN DE BRONNEN VAN PLASTIC IN DE WADDENZEE?

Algemeen: welke type bronnen zijn er wereldwijd voor plastic in de zee?

Op mondiale schaal is het plastic afkomstig van drie hoofdbronnen:

- Kust (60%), plastic afval afkomstig van bevolking minder dan 50 km van de kustlijn verwijderd;
- Rivieren (12%), transporteren plastic afval van binnenland naar de zee toe;
- Visserijen (18%), plastic afval afkomstig van visserijen, bijvoorbeeld netten, touwen en vispluis.

Andere bronnen, die kleiner zijn qua bijdrage zijn plastic afval van transportschepen (9%) en visteelt (1%).

De percentages zijn schattingen van Lebreton *et al.* (2017). Bijdragen kunnen lokaal erg verschillend zijn. Stichting de Noordzee (2021) rapporteert dat 42% van het plastic dat zij langs de Nederlandse kust vinden van visserijbronnen afkomstig is. Behoud van de verhouding van 5:1 in kust:rivieren geeft dan ruwweg 40% van het plastic afkomstig van visserijbronnen, 50% van kustbronnen en 10% van rivieren langs de gehele Nederlandse kust (Van Duinen, Kaandorp & Van Sebille, 2022).

Specifiek: inzoomen op bronnen voor plastic in de Waddenzee

De algemene circulatierichting in de Noordzee is tegen de klok in. Vandaar dat de verwachting is dat het Waddenplastic vooral vanuit het zuidwesten komt, als het niet van lokale bronnen komt. Niet-lokaal plastic spoelt dan vooral aan op kustlijnen die naar het westen gericht zijn (Van Der Molen *et al.*, 2021, Kaandorp *et al.*, 2022). Belangrijke rivierbronnen zijn: de Eems (13.400 kg/jaar), Wezer (19.100 kg/jaar), Elbe (41.700 kg/jaar) (Duitsland), en de IJssel (23.700 kg/jaar) en het IJsselmeer uit Nederland, via de afsluitdijk (Koelmans & Baptist, 2021). De getallen tussen haakjes tonen de hoeveelheid plastic die de betreffende rivier per jaar in zee loost. De waardes zijn afkomstig van een modelstudie van Meijer *et al.* (2021).

Water stroomt via getijdenstromen de Waddenzee in en uit. De grootste hoeveelheden water stromen in en uit bij de doorgangen tussen Texel en Den Helder en tussen Vlieland en Terschelling (Duran-Matute *et al.*, 2014). Er stroomt (gemiddeld) netto water de Waddenzee in via de doorgang tussen Vlieland en Terschelling, en via de sluisen bij de Afsluitdijk. Dit stroomt netto uit via de doorgang tussen Texel en Den Helder, en in mindere mate door de andere doorgangen. Dit geeft enig beeld van de watercirculatie in de Waddenzee, maar de variaties op dit gemiddelde beeld zijn erg groot, vooral dankzij variaties in windrichting en -sterkte.

De Wageningen University & Research (WUR) heeft in 2019 met hun Litter-ID-methode onderzoek gedaan naar de herkomst van zwerfafval op het Waddeneiland Griend. Dit eiland is onbewoond, heeft geen economische activiteit, en is daardoor zelf geen bron van plasticvervuiling. Ook ligt het eiland in het midden van de Waddenzee en is daardoor vrij representatief voor plastic in de Waddenzee. De belangrijkste aangetroffen afvalcategorieën zijn respectievelijk consumentenafval (snoepverpakkingen, flessen, plastic tassen etc.), visserijafval (vispluis, visnetten en touwen), en natuurherstel materiaal. Die laatste categorie

vormde een tijdelijke plasticbron ten tijde van het onderzoek, en is na het stopzetten van dat project in 2020 geen bron van plastic meer (Strietman *et al.*, 2020). Het Wadden Sea Quality Status Report (Fleet *et al.*, 2017) noemt juist plastic van visserijen en de scheepvaart als grootste bron van afval dat aangetroffen wordt op stranden in het Waddengebied, gevolgd door consumentenafval.

Van de plastics die in het Litter-ID-onderzoek traceerbaar waren naar een land van herkomst – bijvoorbeeld door een opschrift op de verpakking – is 70 tot 80 procent afkomstig uit Nederland. 20 tot 30 procent is afkomstig uit het buitenland, vooral uit Engeland en Frankrijk. Gezien de zeestromingen zijn dit ook de verwachte buitenlandse bronlocaties. Het is lastig om bronlocaties binnen een land te herleiden, maar waarschijnlijk heeft de visserijhaven van Harlingen een significante bijdrage (Strietman *et al.*, 2020).

Er zijn verder onderzoeken gedaan, onder andere door Bureau Waardenburg, naar Wadden(macro)plastic met de OSPAR-methode. Maar deze methode classificeert plastic alleen op brontype, en zegt niets over bronlocaties. Bureau Waardenburg onderzocht in 2018 zwerfafval op de locaties Griend, de Steenplaat en de Zuiderduintjes. Op Griend betrof op zowel de noord- als zuidkant ruim driekwart van de gevonden afvalitems plastic. Op de Steenplaat is dit ongeveer de helft van het afval, en op de Zuiderduintjes is dit 90% (in het 1 km monitoringsvak). Ook hier blijken visserij- & scheepvaartafval en consumentenafval de belangrijkste bronnen van plastic. Op Griend werd de hoogste dichtheid zwerfafval gevonden, waarschijnlijk afkomstig van de haven van Harlingen, de eilanden Vlieland en Terschelling, en via de vaarroutes naar zee. Op de Zuiderduintjes is het minste zwerfvuil aangetroffen, waarschijnlijk doordat dit gebied in de luwte ligt van Rottumeroog en

Rotummerplaat en afval er dus moeilijk terecht komt. Op de Steenplaat wordt relatief veel hout gevonden. Dit lijkt vooral afkomstig te zijn van de Noordzee, Texel en de Waddenzee (Bravo Rebolledo & De Gier, 2019).

De input van plastic via rivieren kan zowel voor het heden als de toekomst berekend worden door het

model MP-explorer dat op dit moment ontwikkeld wordt door de WUR (Kooi *et al.*, n.d.). In de (nabije) toekomst kan dit model toegepast worden op het Waddengebied. De uitkomsten van die toepassing kunnen helpen bij het prioriteren van opruimlocaties.

2. WELKE SOORTEN PLASTIC WORDEN AANGETROFFEN IN DE WADDENZEE?

Algemeen: welke soorten plastic zijn er?

Plastics in zee verschillen sterk qua formaat. Op volgorde van groot naar klein is er macro- (groter dan 5 mm), micro- (tussen 1 μm en 5 mm) en nanoplastic (kleiner dan 1 μm). Het grootste deel van het plastic begint als macroplastic en fragmenteert over tijd in kleinere deeltjes door weersinvloeden, frictie met de bodem, en de golven op zee (Ter Halle *et al.*, 2016). Fragmentatie van plastic vindt hoofdzakelijk plaats in kustregio's en binnenwateren als rivieren, doordat deze invloeden vooral op die locaties optreden (Kaandorp, Dijkstra & Van Sebille, 2021).

Het grootste deel (in aantal) van de plasticdeeltjes in de oceaan wereldwijd zijn fragmenten van plastics. Maar qua massa is de bijdrage relatief klein voor deeltjes groter dan 0,1 mm (Kaandorp, Dijkstra & Van Sebille, 2021). Er is nog weinig bekend over de fragmentatiesnelheid van plastics (Koelmans *et al.*, 2017). Het is zeer waarschijnlijk dat deze snelheid sterk afhangt van de milieu-omstandigheden en het polymeertype (Gerritse *et al.*, 2020), daarom is het niet mogelijk om een algemene fragmentatiesnelheid te noemen.

Plastic komt voor in verschillende moleculaire samenstellingen, in verschillende polymeerketens.

Het polymeertype bepaalt grotendeels de materiaaleigenschappen van het plastic. De meest voorkomende plasticpolymeren zijn polyethyleen (PE), polypropyleen (PP), polyvinylchloride (PVC), polystyreen (PS), polyethyleentereftalaat (PET), polyurethaan (PU). Deze types zijn verantwoordelijk voor 80% van de Europese vraag (PlasticsEurope, 2021). Het is dan ook aannemelijk dat deze polymeertypes verantwoordelijk zijn voor een groot deel van het plastic in de Waddenzee.

De plastics worden tijdens productie bewerkt met additieven, weekmakers, kleurstoffen, en brandwerende stoffen. Deze verontreinigingen komen dus ook via het plastic in de zee terecht. Net zoals water, sediment en organismen, bevatten de plastics een 'cocktail aan chemicaliën'. De verschillende toevoegingen zijn beschreven in Wiesinger, Wang & Hellweg (2021). Het is nog onbekend of deze stoffen in de Waddenzee een ecologisch risico vormen (Koelmans *et al.*, 2022), maar afwezigheid van onomstotelijk bewijs van het risico kan absoluut niet gezien worden als bewijs dat het ongevaarlijk is (Campanale *et al.*, 2020).

Specifiek: welke soorten plastic worden aangetroffen in de Waddenzee?

Volgens Materi *et al.* (2021) is de massa van nanoplastic in de zuidelijke Noordzee 38% ten opzichte van microplastic. De massaverhouding macroplastic ten opzichte van de andere types is onbekend. Lorenz *et al.* (2019) laat zien dat gemiddeld 98% van het microplastic (in aantal) in sedimenten kleiner is dan 0,1 mm, datzelfde geldt voor 86% van het microplastic in oppervlaktewater. Ook dit is data uit de zuidelijke Noordzee. In het algemeen nemen de aangetroffen aantallen van plasticdeeltjes af, naar mate de plasticdeeltjes groter worden. Dit geldt voor plasticdeeltjes groter dan 1 mm (Kaandorp, Dijkstra & van Sebille, 2021).

In het rapport dat het NIOZ schreef na het incident met de MSC Zoë staan resultaten van

bemonsteringen van microplastic in de Waddenzee (Foekema *et al.*, 2021). In oppervlaktewater zijn gemiddeld 10 ± 34 deeltjes microplastic per km² aanwezig, met uitschieters tot 214 deeltjes per km². De concentratie is dus zeer variabel. Dat maakt het lastig om in te schatten hoeveel plastic er in de Waddenzee aanwezig is.

Het polymeer polyethyleen (52%) kwam bij deze studie het meest voor, gevolgd door polypropyleen (27%) en polystyreen. Die resultaten zijn vergelijkbaar met studies in andere kustgebieden. In dit onderzoek is alleen gekeken naar microplastics groter dan 300 micrometer. Omdat het meeste plastic in het water kleiner is, zeggen deze aantallen weinig over de echte plasticconcentraties.

3. WAT IS DE ECOLOGISCHE IMPACT VAN HET PLASTIC?

Algemeen: wat is bekend over de ecologische impact van plastic?

De ecologische impact van plastic is afhankelijk van de concentratie, blootstellingsduur, grootte, vorm en het polymeertype van de plastic items of deeltjes. Daarnaast hangt het ook af van het gedrag, de fysiologie en de habitat van de diverse organismen in het ecosysteem en het voedselweb waar ze deel van uitmaken. De ecologische impact van plastic is daardoor erg complex.

Macroplastics zijn vooral risicovol voor verstrikking en verstikking van organismen. Kleinere organismen kunnen ook stikken in microplastics. Micro- en nanoplastics kunnen opgegeten worden door organismen in zee (Bank & Hansson, 2021, Kühn *et al.* 2015). Blootstelling aan voldoende hoge concentraties van plastic kan leiden tot negatieve invloed op de groei, ontwikkeling, gedrag, reproductie en tot sterfte (Kögel *et al.*, 2020, De Ruijter *et al.*, 2020, Chae & An, 2017). Als organismen het plastic opeten en het plastic zich verspreidt naar eetbare weefsels, komt het in de voedselketen en kan

het uiteindelijk ook in de mens terecht komen. De effecten van nano- en microplastic hangen sterk af van het type plastic, de concentratie en de blootstellingstijd (Kögel *et al.*, 2020).

Naast de fysieke effecten van plastic (bijvoorbeeld verstikking en verstrikking) zorgt plasticvervuiling mogelijk ook voor chemische gevaren door de toegevoegde chemicaliën. Ook kan het plastic giftige chemicaliën die al in zee aanwezig waren aan zich binden en concentreren. Als organismen dat plastic vervolgens opeten, kunnen zij ook deze chemicaliën binnen krijgen. Het extra risico veroorzaakt door blootstelling na inname van chemicaliën via consumptie van microplastic is nog nooit berekend (Koelmans, Diepens & Mohamed Nor, 2021). Wel is een framework ontwikkeld om de eventuele extra blootstelling te kwantificeren in ecosystemen als de Waddenzee (Diepens & Koelmans, 2018). Als de plasticconcentraties in de toekomst toenemen, kunnen de gevaren ook toenemen.

Hoe kan de ecologische impact van plastic gemeten worden?

De beste manier om ecologische impact op populaties in te schatten is via een geformaliseerde ecologische-risicobeoordeling (Koelmans *et al.*, 2017). Retrospectieve risicobeoordeling is bedoeld om nadelige effecten vast te stellen die in het verleden zijn opgetreden. Gezien de enorme complexiteit van de ecologie en van plastic, vooral micro- en nanoplastic, is dit zeer bewerkelijk en duur. Een op dit moment wel haalbare methode is een prospectieve risicobeoordeling. Daarmee kan op

basis van metingen, modellen en toekomstscenario's een 'veilige drempelwaarde' qua blootstelling vastgesteld worden, en vervolgens een inschatting van het risico worden gemaakt. Voor de Waddenzee zou hiervoor een nauwkeurige bepaling van de huidige verontreiniging in combinatie met gemodelleerde concentraties van de komende 10-20 jaar, en de bestaande kennis over toxiciteit gebruikt kunnen worden (Koelmans en Baptist, 2021).

Resultaten: wat is de ecologische impact van plastic in de Waddenzee?

Er is momenteel nog weinig onomstotelijk bekend over de ecologische impact van plastic in de Waddenzee. Kortgezegd kan plastic een negatieve ecologische impact hebben als de blootstellingsconcentraties hoog genoeg zijn. Door de grote hoeveelheid variabelen is de mate waarin die negatieve invloeden optreden nog niet betrouwbaar in te schatten, met name gezien de onduidelijkheden in het type en de omvang van de blootstelling. Maar voordat negatieve impacts onomstotelijk aangetoond kunnen worden, is het mogelijk al te laat. Er is immers ook geen enkel bewijs dat de huidige plasticconcentraties in de Waddenzee veilig zijn. Gezien de persistentie van plastic mag bij gelijkblijvend gebruik verondersteld worden dat er met zekerheid ongewenste effecten gaan ontstaan.

Om de ecologische impact in de nabije toekomst in te schatten kan de in de vorige sectie beschreven methode toegepast worden op zowel de huidige situatie als de toekomst, waarbij met

het eerdergenoemde MP-explorer model van de Wageningen Universiteit de plasticbelasting nu en in de toekomst ingeschat kan worden. Dit model geeft precies de karakteristieken weer (verdeling van microplastic, grootte, vorm en polymeertype) die voor risicobeoordeling nodig zijn (Kooi *et al.*, 2021). Vervolgens kan de verspreiding van het plastic worden ingeschat met een Waddenzee-model. Met zo'n model wordt het (toekomstig en historisch) transport van plastic gesimuleerd door de trajecten van virtuele plasticdeeltjes te berekenen aan de hand van de zeestromen in de Waddenzee (Van Sebille *et al.*, 2020).

Gecombineerd kunnen deze tools, mits plasticemissies voldoende bekend zijn, een risicokaart produceren die laat zien welke locaties een hoog risico vormen, en hoe deze zich verplaatsen over de tijd heen. Zo kunnen mogelijke oplossingen ingezet worden op locaties waar het ecologisch risico het grootst is, waardoor de oplossingen het meeste effect hebben.

4. STRATEGIEËN OM BEDREIGINGEN VAN PLASTIC IN WADDENZEE TE VERMINDEREN

Algemeen: welke strategieën zijn er bekend om de bedreigingen van plastic in zee te verminderen?

Hoewel het ecologische risico van de huidige plasticvervuiling in het Waddengebied nog lastig gekwantificeerd kan worden, is het toch van belang om verdere emissies zo veel mogelijk te voorkomen, voordat risico-drempelwaardes overschreden worden. Daarnaast is het opruimen van het al aanwezige plastic ook van belang. Naast de ecologische risico's van plasticvervuiling is het schoonmaken en -houden van het Waddengebied ook vanuit esthetisch en ethisch oogpunt nodig: zeker in een natuurgebied dat op de UNESCO Werelderfgoedlijst staat.

Schmaltz *et al.* (2020) beschrijft 52 verschillende technologieën om plastic te verwijderen. 38 daarvan focussen op het weghalen van al bestaand plastic uit vervuilde ecosystemen. 14 ervan focussen op preventie. 39 technologieën richten zich op macroplastic, 9 op microplastics en 4 op beide. Maar er bestaat niet één perfecte oplossing. Er is een combinatie van strenge regulatie, productie van 'safe and sustainable by design' polymeren, voorkomen van emissies, afvalvermindering, recycling en znodig nog opruimen (weghalen bestaand plastic) nodig om het plasticprobleem aan te pakken (Koelmans, Diepens & Mohamed Nor, 2021, SAPEA, 2019). Maatregelen vroeger in de materiaalketen hebben hierbij doorgaans meer effect (Syberg, 2021, Van Wezel *et al.*, 2017).

Het Regional Action Plan (RAP) van OSPAR bevat een actielijst om afval specifiek in de mariene omgeving door preventie te voorkomen. In het Wadden Sea Quality Status Report (Fleet *et al.*, 2017) worden hieruit de meest relevante actiepunten voor het Waddengebied genoemd:

- Beter omgaan met en verwerken van afval (vooral in de visserij-industrie);

- Afvalproducerende evenementen in de kustregio strenger reguleren (bijvoorbeeld verbod op single-use-plastic);
- Informatie- en educatiecampagnes over de gevaren van plasticvervuiling, gericht op toeristen, inwoners en andere gebruikers van het Waddengebied.

Naast deze preventiemaatregelen is ook het opruimen van het al aanwezige plastic van belang. Veel opruimtechnieken voor macroplastic maken in een bepaalde vorm gebruik van een drijvende lopende band die automatisch plastic verzamelt en uit het water haalt. Het bekendste voorbeeld hiervan is de Interceptor van The Ocean Cleanup (<https://theoceancleanup.com/rivers/>). Dit soort oplossingen werken beter bij hoge concentraties macroplastic, bijvoorbeeld in rivieren.

Traditionele beach-cleanups, bijvoorbeeld door met vrijwilligers afval (macroplastic) van het strand te rapen, helpen het afval te verwijderen voordat het fragmenteert in kleiner en moeilijker op te ruimen microplastic. Wel is dit zeer arbeidsintensief, en daardoor mogelijk alleen efficiënt bij grote hoeveelheden macroplastic op de stranden. De Boskalis Beach Cleanup Tour van Stichting De Noordzee vindt jaarlijks plaats en ruimt met een grote groep vrijwilligers de gehele Noordzeekust op. Vorig jaar werd er ruim 2.000 kg afval van de stranden van de Waddeneilanden opgeruimd, in 2019 ruim 3.000 kg (<https://www.omropfryslan.nl/nieuws/1082251-ruim-2000-kilo-afval-van-het-wad-gehaald-met-beach-cleanup-tour>).

Een recent rapport van Foekema *et al.* (2021) van de Wageningen Universiteit inventariseert opruimmogelijkheden van microplastics na maritieme incidenten, met een focus op het

opruimen rondom de kustlijn. Zij beschrijven methodes om het microplastic op te harken, op te scheppen of op te zuigen, en het vervolgens eventueel te zeven. Opharken en opscheppen zijn geschikter voor zachte bodems zonder begroeiing, zoals stranden. Voor hardere ondergronden moet er gewerkt worden met een soort stofzuiger. Deze methodes zijn zowel kleinschalig (handmatig) als grootschalig (geautomatiseerd) toe te passen. De auteurs concluderen dat stofzuigen de meest geschikte en veelzijdige methode lijkt om aangespoeld plastic op te ruimen. Er zijn een aantal bedrijven die plastic-stofzuigers aanbieden, zoals de *Microplastic-machine* van Nurdle (<https://nurdle.org.uk/microplastic-machine/>). Deze machine heeft ook filtercapaciteiten, om plantaardig materiaal van plastics te scheiden, maar deze zijn nog niet zo ver ontwikkeld dat ze ook plastic en plantaardig

materiaal van dezelfde grootte kunnen scheiden. De machine zal naar verwachting rond april 2022 commercieel beschikbaar zijn voor zo'n 15.000 euro. Ook het Canadese Hoola One (<https://hoolaone.com/home>), *Nul-O-Plastic* van Envisan, of het zuigsysteem van HEBO Maritiem Service zijn interessante opties.

Het is voor alle opruimstrategieën van belang om ook eventuele ecologische schade door het gebruik ervan in overweging te nemen. Bij veel acties zal er enige ecologische schade optreden. Het medicijn (opruimen van plastic) mag niet schadelijker worden dan de kwaal (de aanwezigheid van plastic). In zijn algemeenheid zullen strategieën gericht op preventie gemakkelijker en op grotere schaal tot de gewenste verlaging van blootstelling leiden.

Welke van deze strategieën zijn geschikt/nuttig om toe te passen op de Waddenzee?

Het is lastig om specifieke technieken te beoordelen op hun effectiviteit nu er nog veel onbekend is over de bronnen, de concentraties en de types plastic in de Waddenzee. Veel acties berusten daardoor nog vooral op aannames en minder op meetgegevens. Er zijn daarom eerst pilots nodig van mogelijke oplossingen, voordat ze op grote schaal toegepast kunnen worden. In termen van het Technology Readiness Level (TRL), moeten TRL 4 tot en met 9 doorlopen worden. Stap 4 betreft het testen van een prototype oplossing, in stap 9 wordt een oplossing op schaal in gebruik genomen.

De hierboven beschreven opruimtechnieken uit het rapport van Foekema *et al.* (2021) zijn geschikt om toe te passen in het kustgebied van de Waddenzee. Wel zijn ze in de context van dat rapport beoordeeld op hun capaciteit om plastic op te ruimen na maritieme incidenten. Er is verder onderzoek nodig om te bepalen of deze technieken ook geschikt zijn voor het opruimen van kustzones als er lagere plasticconcentraties zijn, en dit plastic mogelijk voor een groter deel onder het strandoppervlak ligt. Ook kan de ecologische schade toenemen als de opruimtechnieken structureel in plaats van incidenteel gebruikt worden.

Een andere interessante optie voor het Waddengebied is het gebruik van mosselen om microplastics uit het water te filteren. Mosselen filteren niet-eetbare deeltjes, waaronder microplastic, uit de zee en scheiden deze uit in hun uitwerpselen. Die uitwerpselen slaan neer op de zeebodem. Die uitwerpselen kunnen verzameld worden, en het microplastic kan eruit gefilterd worden. Dit concept is succesvol getest in Plymouth (Plymouth Marine Laboratory, 2021), en kan volgens computermodellen 20 tot 25% van de microplastics filteren. Vooral als de mosselkolonies in de buurt van riviermonden geplaatst worden, kunnen ze goed werken (Koelmans & Baptist, 2021).

Filtratie met behulp van mosselen kan in potentie toegepast worden in het Eems-Dollard-estuarium, in het grensgebied van Nederland en Duitsland. Daar kan het de aanvoer van microplastics vanuit de Eems de Waddenzee in verminderen (Koelmans & Baptist, 2021). De mosselbanken kunnen ook geplaatst worden bij andere riviermondingen naar de Waddenzee. Oesters bevatten vergelijkbare filtratie-kwaliteiten en kunnen in de zomer maanden gebruikt worden.

Het grootste deel van de technieken genoemd in Schmaltz *et al.* (2020) focust op opruimen in plaats van preventie. Toch hebben preventieve maatregelen duidelijke voordelen. Het plastic is bij eerder optreden namelijk minder verspreid en de technieken hebben effect op grotere schaal. Ook het opruimen van macroplastics op stranden met beach-cleanups is effectief (maar ook erg arbeidsintensief), doordat het fragmentatie en verdere verspreiding van plastic voorkomt.

Verder zijn er in de keten van gebruik naar emissie ook verschillende technieken gericht op het filteren van plastic uit afvalwater met behulp van meshnetten. Voorbeelden zijn PumpGuard en TrashTrap, ontwikkeld door het Amerikaanse bedrijf StormTrap. Er zijn aanwijzingen, maar het is niet met zekerheid bekend, dat afvalwater een significante plasticbron in de Waddenzee is. Er is weinig preventietechnologie tegen het verlies van plastic-productiepellets tijdens scheepvervoer of verlies van plastic tijdens het gebruik, zoals bij visnetten (Schmaltz *et al.*, 2020).

Er zijn verschillende initiatieven gaande om plasticvervuiling van visserij tegen te gaan, een belangrijke plasticbron in de Waddenzee. Veel van deze initiatieven zijn voortgekomen uit de Green Deal – Visserij voor een Schone Zee (Rijksoverheid, 2014), die liep van 2014 tot 2020. De evaluatie van dit project (Wienhoven & Nijmeijer, 2019) is gematigd positief, gemiddeld beoordelen betrokken partijen het project desgevraagd met een 3,7 uit 5. Vooral wat betreft het recyclen van visserijafval is nog veel te winnen. Het doel was om 95 procent van het visserijafval te recyclen, slechts 43 procent van de respondenten denkt dat dit is gelukt. Vooral het recyclen van vistuig blijkt nog een uitdaging vanwege de samenstelling daarvan.

Er zijn een aantal bio-afbreekbare alternatieven in ontwikkeling voor het veel aangetroffen vispluis (Strietman, 2021). Omdat er al veel initiatieven gaande zijn om plasticvervuiling vanuit de visserijsector te voorkomen, is het mogelijk lastiger om hier nog een goede toevoeging in te doen.

Welke actoren moeten betrokken worden bij oplossingsstrategieën?

De Volkskrant geeft een overzicht van partijen die verantwoordelijk zijn voor het Waddengebied (Van den Berg & Geelen, 2021). Zij noemen: De Waddenvereniging, vijf ministeries, drie kustprovincies, vijf waddeneilanden, acht kustgemeenten en diverse waterschappen. Ook Staatsbosbeheer en Natuurmonumenten spelen een rol. De kustprovincies, het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) zijn verenigd in de Beheerautoriteit Waddenzee sinds 2020. Er is sprake van ‘bestuurlijke spaghetti’. Al deze bestuurlijke partijen zijn mogelijk van belang in de keuze voor oplossingsstrategieën.

Verder kunnen economisch-medegebruikers van het Waddengebied bij preventiemaatregelen betrokken worden. Het gaat hierbij vooral om visserijen (visserijafval) en scheepsvaartbedrijven enerzijds, en recreërs en inwoners van de omgeving (consumentenafval) anderzijds. Afhankelijk van de gekozen oplossingsstrategie (opruimen) kunnen extra partijen betrokken worden, bijvoorbeeld om installaties te produceren, installeren en beheren.

Voor de mosselfiltratie zal samengewerkt moeten worden met mosselkwekers. Ook moeten de benodigde mossel-filterinstallaties ontworpen en gemaakt worden door deskundige partijen.

LITERATUUR

Bank, M.S., Hansson, S.V., “The microplastic cycle: an introduction to a complex issue,” In: *Bank M.S. (eds) Microplastic in the Environment: Pattern and Process. Environmental Contamination Remediation and Management.* https://doi.org/10.1007/978-3-030-78627-4_1, pp. 1-16, Springer, Cham, 2021.

Bravo Rebolledo, E.L., De Gier, P.J., “Zwerfafval monitoring Waddenzee. Pilot studie naar het voorkomen van zwerfvuil op de Waddenzee in 2018”, *Bureau Waardenburg*, Rapportnr. 19-002. Bureau Waardenburg, Culemborg, 2019.

Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., Uricchio, V. T., “A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>, 17(4), 1212, 2020.

Chae, Y., An, Y. “Effects of micro- and nanoplastic on aquatic ecosystems: Current trends and perspectives,” *Marine Pollution Bulletin*, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.070> vol. 124, pp. 624-632, 2017.

De Ruijter, V.N., Redondo-Hasselerharm, P.E., Gouin, T., Koelmans, A.A., “Quality criteria for microplastic effect studies in the context of risk assessment: A critical review,” *Environ. Sci. Technol.* <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.0c03057> 54, 19, 11692-11705, 2020.

Diepens, N.J., Koelmans, A.A., “Accumulation of plastic debris and associated contaminants in aquatic food webs”, *Environ. Sci. Technol.*, <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02515>, 52, 15, 8510-8520, 2018.

Duran-Matute, M., Gerkema, T., De Boer, G.J., Nauw, J.J., Gräwe, U., “Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study”, *Ocean Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/os-10-611-2014>, 10, 611-632, 2014.

Fleet D.M., Dau K., Gutow L., Schulz M., Unger B. & van Franeker J.A., “Marine litter. In: Wadden Sea Quality Status Report 2017,” Eds.: Kloepper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany, 2017.

Foekema, E., Kühn, S., Elschot, K., Van Puijenbroek, M., “Inventarisatie aspecten rond opruimen microplastics na maritieme incidenten,” *Wageningen Marine Research*, rapport C095/21, <https://doi.org/10.18174/558084>, 2021.

Foekema, E., van der Molen, J., Asjes, A., Bijleveld, A., Brasseur, S., Camphuysen, K., van Franeker, J.A., Holthuijsen, S., Kentie, R., Kühn, S., Leopold, M., Kleine Schaars, L., Lok, T., Niemann, H., Schop, J., “Ecologische effecten van het ongeluk met de MSC Zoe op het Nederlandse Waddengebied, met focus op microplastics,” *NIOZ Rapport 2021-03. NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research, 't Horntje, Texel, The Netherlands*, <http://doi.org/10.25850/nioz/7b.b.mb>, 2021.

Gerritse, J., Leslie, H. A., de Tender, C. A., Devriese, L. I., Vethaak, A. D., “Fragmentation of plastic objects in a laboratory seawater microcosm,” *Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67927-1>, 10, 10945, 2020.

Kaandorp, M. L. A., Dijkstra, H. A. and van Sebille, E., “Modelling size distributions of marine plastics under the influence of continuous cascading fragmentation,” *Environ. Res. Lett.* 16, 054075, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe9ea>, 2021.

Kaandorp, M. L. A., Ypma, S. L., Boonstra, M., Dijkstra, H. A., and van Sebille, E. “Using machine learning and beach cleanup data to explain litter quantities along the Dutch North Sea coast,” *Ocean Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/os-2021-83>, in review, 2022.

Koelmans, A.A., Baptist M., “Microplastic in de Waddenzee. Diagnose en Remedie,” *WUR*, 2021.

- Koelmans, A.A., Besseling, E., Foekema, E. Kooi, M., Mintenig, S., Ossendorp, B.C., Recondo-Hasselerharm, P.E., Verschoor, A., Van Wezel, A.P., Scheffer, M., “Risks of plastic debris: unravelling fact, opinion, perception and belief,” *Environ. Sci. Technol.*, <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02219>, 51, 20, 11513-11519, 2017.
- Koelmans, A.A., Diepens, N.J., Mohamed Nor, N.H., “Weight of Evidence for the Microplastic Vector Effect in the Context of Chemical Risk Assessment,” In: *Bank M.S. (eds) Microplastic in the Environment: Pattern and Process. Environmental Contamination Remediation and Management.* https://doi.org/10.1007/978-3-030-78627-4_6, pp. 155-197, Springer, Cham, 2021.
- Koelmans, A.A., Kooi, M., Law K.L., van Sebille, E., “All is not lost: deriving a top-down mass budget of plastic at sea,” *Environ. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9500>, 12, 114028, 2017.
- Koelmans, A.A., Redondo-Hasselerharm, P.E., Mohamed Nor, N.H., de Ruijter, V.N., Mintenig, S.M., Kooi, M., “Risk Assessment of Microplastic Particles”, *Nature Reviews Materials*, *In press*, 2022.
- Kögel, T., Bjorøy, Ø., Toto, B., Bienfait, A.M., Sanden, M., “Micro- and nanoplastic toxicity on aquatic life: Determining factors,” *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136050>, 709, 136050, 2020.
- Kooi, M., Primpke, S., Mintenig S.M., Lorenz, C., Gerdt, G., Koelmans, A.A., “Characterizing the multidimensionality of microplastic across environmental compartments,” *Water research*, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117429>, 202, 117429, 2021.
- Kooi et al. *in prep.* (n.d.)
- Kühn, S., Rebolledo, E.L.B., van Franeker, J.A. “Deleterious effects of litter on marine life,” In: *Marine anthropogenic litter*, https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_4, pp. 75-116. Springer, Cham, 2015.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. *et al.* “Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic,” *Sci Rep*, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>, 8, 4666, 2018.
- Lorenz, C., Roscher, L., Meyer, M.S., Hildebrandt, L., Prume, J., Löder, M.G.J., Primpke, S., Gerdt, G., “Spatial distribution of microplastics in sediments and surface waters of the southern North Sea,” *Environmental Pollution*, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.093>, 2019.
- Materi, D., Holzinger, R., Niemann, H. “Nanoplastics in the Dutch Wadden Sea,” *EGU General Assembly 2021, online*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-12012>, 2021
- Meijer, L.J.J., Van Emmerik, T., Van der Ent, R., Schmidt, C., Lebreton, L., “More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean,” *Science Advances*, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>, 7, 18, 2021.
- Onink, V., Jongedijk, C.E., Hoffman, M.J., van Sebille, E., Laufkötter, C. “Global simulations of marine plastic show plastic trapping in coastal zones,” *Environmental research letters*, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abecbd>, 16, 064053, 2021.
- PlasticsEurope, “Plastics – the Facts 2021 An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2010,” *PlasticsEurope*, <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2011-Plastics-the-facts.pdf>, 2021.
- Plymouth Marine Laboratory, “PML trials pioneering nature-based solution for the marine plastic crisis”, *PML*, https://pml.ac.uk/News_and_media/News/PML_trials_pioneering_nature_based_solution_for_the_marine_plastic_crisis?s=09, 2021.
- PumpGuard, <https://stormtrap.com/products/pumpguard/>
- Rijksoverheid, “GD171 Green deal Visserij voor een schone zee,” <https://www.greendeals.nl/sites/default/files/downloads/GD171-Green-Deal-Visserij-voor-een-Schone-Zee.pdf>, 2019.

SAPEA, “A scientific perspective on microplastics in nature and society,” *SAPEA*, <https://doi.org/10.26356/microplastics>, 2019.

Schmaltz, E. *et al.* “Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution,” *Environment International*, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106067>, 144, 2020.

Strietman, W.J., “Eindrapportage VisPluisvrij; Activiteiten, resultaten en aanbevelingen op basis van de resultaten van het project VisPluisvrij (2013–2018) en het aansluitende project ‘Testfase Biopluis’ in 2020,” Wageningen, Wageningen Economic Research, 2021.

Strietman, W.J., M.J. van den Heuvel-Greve, A.M. van den Brink, G.A. de Groot, M. Skirtun, Bravo Rebolledo, E.L., Koffeman, K.J., “Resultaten bronanalyse zwerfafval Griend; Resultaten van een gedetailleerde bronanalyse van zwerfafval dat op het Waddeneiland Griend verzameld is en samen met lokale stakeholders tijdens een Litter-ID-sessie in oktober 2019 onderzocht is,” Wageningen, Wageningen Economic Research, 2020.

Syberg, K. *et al.*, “Regulation of plastic from a circular economy perspective”, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100462>, 29, 100462, 2021.

Ter Halle, A., Ladirat, L., Gendre, X., Goudouneche, D., Pusineri, C., Routaboul, C., Tenailleau, C., Duployer, B., Perez, E., “Understanding the fragmentation pattern of marine plastic debris”, *Environ. Sci. Technol.*, <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00594>, 50, 11, 5668–5675, 2016.

Thornton Hampton, L. *et al.* “A living tool for continued exploration of the toxicity of microplastics,” *Microplastics & Nanoplastics*, in prep.

TrashTrap, <https://stormtrap.com/products/trashtrap/>

Van der Molen, J., Van Leeuwen, S.M., Govers, L.L., Van der Heide, T., Oloff, H., “Potential microplastic dispersal and accumulation in the North Sea, with application to the MSC Zoe incident”, *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.607203>, 2021.

Van den Berg, J., Geelen, J.P., “Wie beschermt de Waddenzee eigenlijk?” *de Volkskrant*, <https://www.volkskrant.nl/kijkverder/v/2021/wie-beschermt-de-waddenzee-eigenlijk~v457625/>, 2021.

Van Duinen, B., Kaandorp, M.L.A., van Sebille, E. “Identifying Marine Sources of Beached Plastics Through a Bayesian Framework: Application to Southwest Netherlands”, *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2021GL097214>, 2022.

Van Sebille, E., *et al.*, “The physical oceanography of the transport of floating marine debris”, *Environ. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d7d>, 15, 023003, 2020.

Van Wezel, A. P., Ter Laak, T. L., Fischer, A., Bäuerlein, P. S., Munthe, J., Posthuma, L., “Mitigation options for chemicals of emerging concern in surface waters; operationalising solutions-focused risk assessment”, *Environ. Sci.: Water Res. & Technol.*, <https://doi.org/10.1039/C7EW00077D>, 3, 403–414, 2017.

Wienhoven, M. Nijmeijer, C., “Evaluatie Green Deals zwerfafval in zee,” Witteveen & Bos in opdracht van Rijkswaterstaat, <https://www.kimonederlandbelgie.org/wp-content/uploads/Eindrapport-Evaluatie-Green-Deals-Witteveen-Bos.pdf>, 2019.

Wiesinger, H., Wang, Z., Hellweg, S., “Deep dive into plastic monomers, additives, and processing aids”, *Environ. Sci. Technol.* 55, 9339–9351, 2021.



waddenacademie